

Мониторинг эскалаторов метрополитена при оценке их остаточного ресурса на основе магнитных методов контроля



Я. С. Вагулин,
канд. техн. наук,
доцент, зав. кафедрой
«Автоматизированное
проектирование»,
Петербургский
государственный
университет путей
связи (ПГУПС)



М. С. Коровина,
ассистент кафедры
«Автоматизированное
проектирование»,
ПГУПС



С. К. Коровин,
канд. техн. наук,
доцент кафедры
«Подъемно-транспортные,
путевые и строительные
машины», ПГУПС



В. А. Попов,
канд. техн. наук,
заведующий кафедрой
«Подъемно-транспортные,
путевые и строительные
машины», ПГУПС

В 2005–2012 гг. Петербургский государственный университет путей сообщения проводил серию экспертиз промышленной безопасности эксплуатации эскалаторов Санкт-Петербургского метрополитена. Ставилась цель определить возможность, сроки и условия дальнейшей эксплуатации машин, в том числе узко-балюстрадных эскалаторов серии ЭТХ-3/75. Экспертиза включала в себя неразрушающий магнитный контроль в режиме мониторинга, необходимость которого обусловлена конструктивными и эксплуатационными особенностями эскалаторов нового поколения.

В соответствии с Федеральным законом № 116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», принятым Государственной думой 20 июня 1997 г., эскалаторы относятся к категории технических устройств, используемых на опасных производственных объектах, и подлежат экспертизе промышленной безопасности по истечении их нормативного срока службы.

Эскалаторы новой конструкции ЭТХ-3/75 были разработаны ООО «Конструктор» (Санкт-Петербург) и установлены на подземных переходах между станциями «Спасская» и «Сенная», и «Спасская» и «Садовая».

Такие эскалаторы позволяют повысить пропускную способность эскалаторных тоннелей и имеют ряд особенностей, а именно [1]:

- уменьшенные габариты (ширину, радиусные участки, диаметр приводной звездочки) во всем диапазоне высот подъема;
- шаг роликов тяговой цепи эскалатора, кратный шагу звеньев цепи, что позволяет в несколько раз по сравнению с прежними моделями уменьшить делительный диаметр приводной звездочки;
- перенос привода на прямолинейный участок обеспечен за счет применения тяговых звездочек эвольвентного профиля, благодаря чему поддерживается постоянство величины и направления вектора скорости рейки;

- взаимный поворот звеньев цепи на криволинейных участках происходит при минимальной нагрузке, большие натяжения действуют только в пределах прямолинейных участков;

- применение центрального бегунка с направляющей обеспечивает неперекашиваемость ступеней и предотвращает боковые уводы лестничного полотна;

- размеры привода таковы, что он помещается в габаритах лестничного полотна между рабочей и холостой ветвями, тяговое усилие наращивается путем параллельной установки нескольких главных валов;

- отсутствие сложных фундаментов и обширных машинных помещений, позволяющее существенно сэкономить при строительстве новых станций за счет сокращения объема строительных и монтажных работ.

При этом эксплуатация эскалаторов ЭТХ-3/75 выявила ряд технических проблем.

13 мая 2010 г. заклинило несколько ступеней перехода «Сенная» — «Спасская». Было принято решение снизить эксплуатационную скорость до 0,65 м/с.

В июле 2010 г. на переходе со станции «Спасская» — «Сенная площадь» имел место инцидент с перекосом ступеней: «одну из ступенек перекосило, и она под углом с ходу напоролась на стальные зубья гребенки. Следом начали трещать последующие ступеньки, одна за другой...» [2]. Рифленый алюминиевый настил одной из ступеней

не попал в зазор между зубьями нижней гребенки, в результате произошло столкновение с торцевой поверхностью посадочной площадки. Было разрушено три ступени. По словам конструктора эскалаторов В. К. Христича, основная причина аварии заключается в износе поддерживающих роликов.

Специалисты Ростехнадзора обнаружили ряд других конструктивных недочетов эскалаторов новой серии. В результате было принято решение о проведении периодического мониторинга оборудования с целью модернизации конструкции с учетом всех недоработок.

В ходе мониторинга оценивались результаты одновременного применения коэрцитиметрического метода и метода магнитной памяти металла.

Первый метод предполагал использование магнитного структуроскопа КРМ-Ц-К2М, поставляемого организацией «Специальные научные разработки» («СНР») совместно с ЗАО «НИИИИ МНПО „Спектр“» (Москва). Мониторинг эскалаторов методом магнитной памяти металла производился с помощью:

- модернизированного манипулятора «мышь» на основе трехкомпонентных феррозондов, построенных на преобразователях Холла, ПХЭ606117В (магнитная чувствительность >200 мкВ/мТл) и ПХЭ606118В (магнитная чувствительность >30 мкВ/мТл) производства научно-производственной фирмы «Сенсор», Санкт-Петербург (рис. 1);

- комплекса АСК-3117 с усилителем;
- пакета прикладных программ для управления и обмена с АСК-310х АРР-3007 и профессиональной версии программного обеспечения АСК-3107-РО.

Неразрушающий магнитный контроль механических свойств ферромагнитных материалов основан на корреляции между их магнитными и физико-механическими свойствами, когда они одновременно зависят от одних и тех же факторов: химического состава, режима термической обработки, пластической

деформации, микро- и макронапряжений, расположения дислокаций и др.

Что касается углеродистых малолегированных сталей, то вышеперечисленные факторы одновременно и однозначно влияют на механические и магнитные свойства металла. Поэтому неразрушающий магнитный метод может успешно применяться для контроля напряженно-деформированного состояния металла, уровня пластической деформации и усталостных повреждений наиболее нагруженных узлов металлоконструкций, работающих в условиях длительного циклического нагружения.

Микро- и макродефекты структуры, накапливаясь в металле в процессе циклического нагружения при растяжении, сжатии, изгибе или кручении, как бы собирают и хранят информацию, однозначно связанную с максимальными величинами действующих нагрузок. В результате структура ферромагнитного материала конструкции выполняет функции своеобразного запоминающего датчика пикового значения силы, а ряд магнитных параметров, однозначно связанных с количеством нарушений структуры материала, является, таким образом, своеобразным отображением силового режима работы конструкции.

В соответствии с «Методическими рекомендациями по обследованию технического состояния и расчету остаточного ресурса эскалаторов Петербургского метрополитена», согласованными Управлением технического надзора Ростехнадзора (письмо № 09-03/561 от 28.03.2005 г.), в качестве основного контролируемого параметра при использовании коэрцитиметрического метода была выбрана величина коэрцитивной силы H_c , так как она однозначно связана с остаточной пластической деформацией ε_{pl} (амплитудой необратимой деформации) при статическом и циклическом нагружении металлоконструкции в процессе эксплуатации.

Для оценки остаточного ресурса применялись экспериментальные зависимости $N(H_c)$ в координатах: значения коэрцитивной силы $H_c(A/cm)$ — число циклов нагружения N .

При проведении коэрцитиметрического контроля несущих элементов металлоконструкций выбирались участки с максимальными значениями H_c^{max} . По номограмме восстанавливали перпендикуляр до пересечения с кривой $N(H_c)$ для соответствующей амплитуды нагружения σ_c и получали значение N_0 . Разность между максимальным числом ци-

клов до разрушения N_p и N_0 для данного σ_c составляло оставшееся число циклов работы эскалатора:

$$N_{ост} = N_p - N_0.$$

Остаточный ресурс в километрах пробега (в сменах) вычислялся на основании ожидаемой загрузки эскалатора и частоты нагружения на 1 км пробега в смену ($C_{см}$) в процессе эксплуатации:

$$P = (N_p - N_0) / C_{см}.$$

Показателем остаточного ресурса P по ГОСТ 27.002-89 является величина γ — процентный ресурс; это суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах. Оценка ресурса производилась по наиболее слабому звену среди несущих (расчетных) элементов металлоконструкции эскалатора. В наиболее нагруженном узле конструкции остаточный ресурс P (в процентах) вычислялся по соответствующей усталостной кривой. Ресурс металлоконструкции может быть увеличен за счет своевременного выявления дефектных зон и ремонта, позволяющего восстановить механические свойства металла.

Весь прогнозируемый срок работы эскалатора делился на этапы по степени накопления остаточных деформаций и микроповреждений:

- 1-й этап: режим надежной эксплуатации при $H_c^{max} \ll H_c^T$, когда металл работает в упругой области диаграммы нагружения и максимальные напряжения ниже предела упругости;

- 2-й этап: режим «контролируемой» эксплуатации при $H_c^{max} \leq H_c^T$, когда отдельные элементы металлоконструкции эскалатора работают в упруго-пластической области диаграммы нагружения, а максимальные остаточные напряжения достигают физического предела текучести металла;

- 3-й этап: «критический» режим эксплуатации при $H_c^T \leq H_c^{max} \leq H_c^B$, когда отдельные элементы металлоконструкции эскалатора работают в упруго-пластической и пластической областях диаграммы нагружения, а остаточные максимальные напряжения превышают предел текучести металла.

При проведении мониторинга эскалаторов коэрцитиметрическим методом контроля предлагается заполнять паспорт магнитного контроля. В паспорт заносят значения H_c , измеренные при первичном контроле металлоконструкции эскалатора, и выявляют наиболее нагруженные элементы конструкции. В процессе первичного контроля опре-

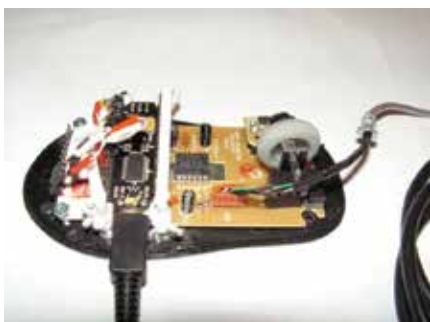


Рис. 1. Модернизированный манипулятор «мышь»

деляют также концентрацию напряжений в сварных соединениях. В результате складывается картина исходного состояния металлоконструкции.

Процедуру коэрцитиметрического метода контроля повторяют в одних и тех же точках (согласно карте магнитного контроля). Контроль осуществляется в двух направлениях: вдоль профиля элемента металлоконструкции эскалатора (H_c^x) и поперек (H_c^y). Построение распределения H_c по длине профиля элемента металлоконструкции эскалатора ведется по максимальным значениям коэрцитивной силы в каждой точке. Это позволяет учесть одновременно две характеристики слабого звена металлоконструкции, влияющие на остаточный ресурс: направление максимальных напряжений (анизотропию) и величину действующих напряжений.

Измерения в 25–30 точках каждого элемента металлоконструкции эскалатора обеспечивают возможность статистического анализа по критерию Стьюдента для малых выборок. Общее число замеров коэрцитивной силы H_c на натяжной и приводной станциях, наклонном ходе и опорах главного вала (более 460 точек) определяется на основе анализа нормального распределения Гаусса.

Анализ процессов, происходящих в металле металлоконструкции эскалатора в ходе эксплуатации, можно произвести на основании оценки результатов контроля накопления повреждений по скорости роста коэрцитивной силы H_c в расчетных элементах металлоконструкции.

Очевидно, что процесс накопления повреждений в металле при циклическом нагружении металлоконструкции эскалатора сопровождается ростом коэрцитивной силы H_c пропорционально пробегу эскалатора на момент проведения магнитного контроля с учетом его конструктивных и эксплуатационных особенностей.

Металлоконструкции эскалаторов с критическими значениями H_c в слабых звеньях при любом режиме эксплуатации нуждаются в капитально-восстановительном ремонте. Таким образом, своевременное выявление и ремонт слабого звена в элементах металлоконструкции могут существенно увеличить остаточный ресурс эскалатора. Из сравнения зависимостей $H_{c_{max}}$ от P_3 (пробега эскалатора на момент проведения контроля) и средних H_c от P_3 следует, что первая из них определяет остаточный

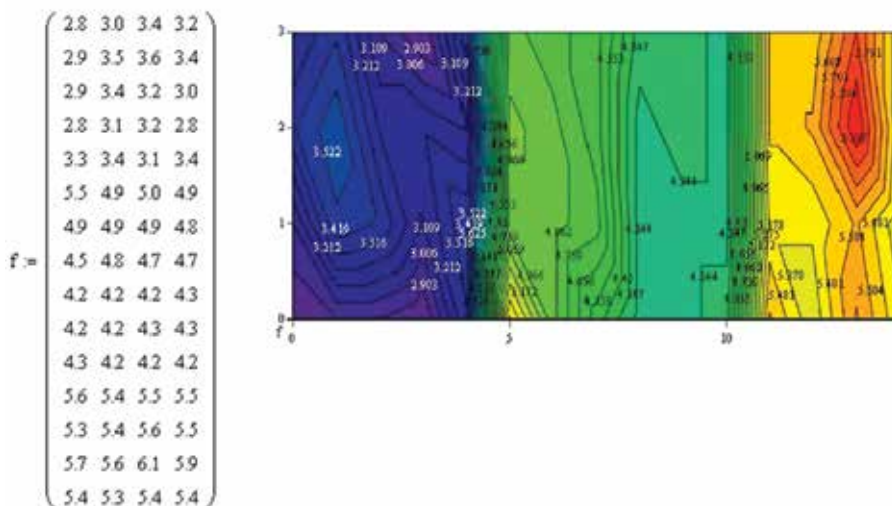


Рис. 2. Фрагмент компьютерной обработки результатов коэрцитиметрического метода контроля внутреннего продольного пояса металлоконструкции эскалатора ЛТ-3 в зоне А

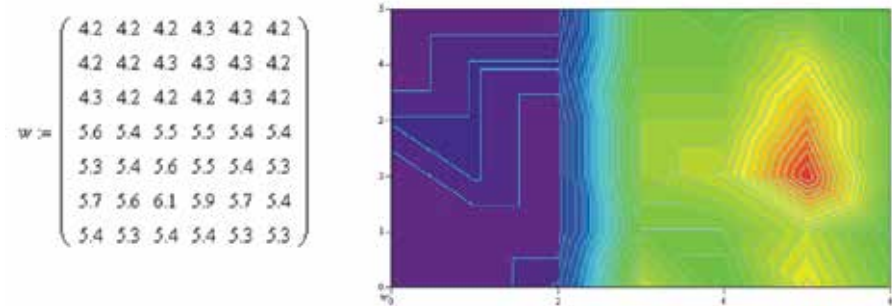


Рис. 3. Фрагмент компьютерной обработки результатов коэрцитиметрического метода контроля наружного продольного пояса металлоконструкции эскалатора ЛТ-3 в зоне А

ресурс металлоконструкции эскалатора, а вторая — возможную продолжительность эксплуатации при условии снятия концентрации напряжений в слабых звеньях металлоконструкции.

Используя данные паспорта магнитного контроля и методику коэрцитиметрического метода мониторинга H_c при повторных обследованиях эскалатора, можно с вероятностью 0,9 прогнозировать остаточный ресурс металлоконструкции по номограммам, связывающим скорость накопления повреждений при усталости и пробег эскалатора. Каждая из кривых описывает один и тот же физический процесс накопления повреждений при малоцикловой усталости с вероятностью, возрастающей по мере увеличения частоты применения коэрцитиметрического метода контроля состояния металла. Так как абсолютная ошибка в определении H_c прибором КРМ-ЦК-2М составляет 0,05 А/см, а относительная ошибка при контроле металла не превышает 5 %, минимальную погрешность индивидуального прогноза остаточного ресурса коэрцитиметрическим методом

можно получить при использовании паспорта контроля эскалатора в режиме мониторинга. Мониторинг по коэрцитивной силе H_c , начиная с данных паспорта магнитного контроля, позволяет предупреждать переход металла в стадию разупрочнения и предотвращать аварийные ситуации при эксплуатации эскалаторов.

Примеры магнитного контроля в двух направлениях (вдоль профиля элемента металлоконструкции эскалатора (H_c^x) и поперек (H_c^y) с последующей обработкой результатов в среде Matcad представлены на рис. 2–3.

Характерные места выборочного контроля напряженно-деформированного состояния элементов ферм секций, вертикальных листов ферм и вертикальных листов креплений криволинейных направляющих эскалаторов на подземных переходах между станциями «Спаская» — «Сенная» и «Спаская» — «Садовая» представлены на рис. 4.

При проведении мониторинга состояния металлоконструкций и решении задач прогноза остаточного ресурса возникает необходимость в оперативном



Рис. 4. Характерные места выборочного контроля: а – элементы ферм секций; б – вертикальные листы ферм; в – вертикальные листы креплений криволинейных направляющих



Рис. 5. Окно обработки многофункционального датчика

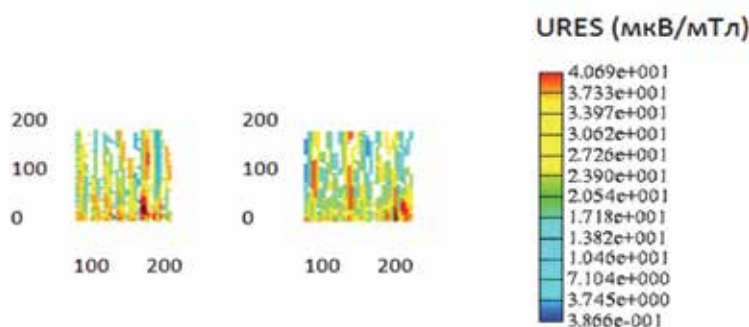


Рис. 6. Динамика зависимости значения напряженности магнитного поля участка поверхности исследуемого объекта за период в один год

контроле проблемных участков предыдущих циклов исследования с сохранением первичной картины напряженно-деформированного состояния. В данном случае ручная разметка сложных криволинейных поверхностей большинства машин и механизмов для их дальнейшей идентификации по точкам контроля трудоемка и экономически нецелесообразна. Для решения данной задачи был апробирован режим мониторинга на основе применения модернизированного манипулятора «мышь» с трехкомпонентным феррозондом. Периодическая регистрация и анализ напряженности собственных магнитных полей рассеяния металла в зоне развивающихся повреждений объекта позволяет в этом случае идентифицировать локальные источники собственных магнитных полей рассеяния без уничтожения тенден-

ций их изменения. Окно обработки трехкомпонентного феррозонда модернизированного манипулятора «мышь» представлено на рис. 5.

Применение модернизированного манипулятора «мышь» значительно увеличило производительность мониторинга напряженности собственных магнитных полей рассеяния металла в зоне развивающихся повреждений. Синхронизация координат местоположения точки сканирования и показания датчика позволяет получать рельеф пространственного представления функции отображения зависимости значения напряженности магнитного поля по месту во времени (рис. 6).

Мониторинг осуществлялся на макроуровне: в рабочем состоянии, без ревизии агрегатов. В качестве признака повреждения конструкции выбиралось

резкое изменение значений и знака собственных магнитных полей рассеяния. При обработке результатов замеров применялся пространственный анализ напряженности собственных магнитных полей рассеяния металла в зоне развивающихся повреждений посредством кепстрального представления и проведения wavelet-анализа. Кепстральное представление позволило идентифицировать локальные источники собственных магнитных полей рассеяния в отдельных точках контроля.

Классификация состояния строилась по результатам кепстрального и wavelet-анализа. Классификационным признаком считалось скачкообразное изменение знака и величины напряженности магнитного поля рассеяния в зонах концентрации напряжений и деформаций по компонентам вектора.

Изучение изменения коэрцитивной силы и вектора напряженности магнитного поля рассеяния металла в зоне развивающихся повреждений от времени в конкретной контрольной точке элемента эскалатора позволяет утверждать, что состояние конструкций эскалаторов за время эксплуатации (2005–2012 гг.) изменилось.

Wavelet-анализ по каждой из компонент вектора способствует выявлению отклонений состояния материала элементов эскалатора от допустимых и позволяет предсказать понижение прочностных характеристик конструкции, своевременно принять меры по предупреждению аварийной ситуации на исследуемом объекте.

Результаты комплексной обработки экспериментальных данных показали перспективность применения трехкомпонентных феррозондов для мониторинга состояния элементов эскалаторов на основе метода магнитной памяти металла. ■

Литература

1. Христин В. К., Киреев Ю. В. Создание эскалаторов нового поколения – рациональный путь повышения пропускной способности станций метрополитенов. URL: <http://www.metro.ru/library/analytics/599>.
2. Кольцов М. Эскалатор Христинча сложился под ногами пассажиров // Вечерний Петербург. 20 июля 2010 г. URL: <http://www.vppress.ru/stories/eskalator-hristicha-slojilsya-pod-nogami-passajirov-8068>.